

An analysis of scattering with N/D method and meson

著者	赤間 尚之
号	46
学位授与番号	1995
URL	http://hdl.handle.net/10097/39022

氏名・(本籍)	あか ま なお ゆき 赤 間 尚 之
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1995号
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	An analysis of $\pi\pi$ scattering with N/D method and σ meson (N/D 法をもちいた $\pi\pi$ 散乱の解析と σ 中間子)
論文審査委員	(主査) 教授 日笠 健一 教授 滝川 昇 助教授 山口 昌弘, 棚橋 誠治, 白井 淳平

論文目次

1	Introduction
1.1	The existence of the σ meson
1.2	$\pi\pi$ scattering and the σ meson
2	Formalism
2.1	The foundations of elastic $\pi\pi$ scattering
2.2	The N/D method
2.3	Determination of parameters $d_{l,j}$
3	Numerical Results
3.1	Differences between the pion massive case and massless case
3.2	Parameter fitting
3.3	Locations of poles of partial wave amplitudes
4	Summary and Discussions
A	Appendix
A.1	Data of particles
A.2	Experimental data of phase shifts
A.3	Isospin decomposition of amplitude
A.4	Unitarity of the partial wave amplitude
A.5	Detailed calculations for D_{ll}
A.6	Partial wave amplitudes up to the order p^4
A.7	The case that pion is massless
	References

論文内容要旨

σ 中間子は、量子数 $I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++})$ を持ち、1 GeV より軽い質量で、 π 中間子と強く結合する中間子である。この中間子は長い間議論がある粒子であり、いま現在でもその存在が確立されたとは言い切れない。

このような量子数を持つ中間子は、線形 σ 模型や Nambu–Jona-Lasinio 模型といったカイラル対称性の破れを記述するいくつかの簡単な模型で自然に導入され、理論的になじみのあるものである。

一方で、このような中間子はカイラル対称性から必ずしも要求されるものではない。非線形 σ 模型では、 π 中間子の非線形変換によってカイラル変換があらわれ、 σ 中間子はまったく必要とされない。

また、非相対論的なクォーク模型を考える限りにおいても、 σ 中間子のような粒子を考えるのは難しい。非相対論的なクォーク模型は、さまざまな質量を持った中間子のスペクトルを量子数で分類することに成功している。この模型では π 中間子や ρ 中間子といった擬スカラー、ベクター状態をクォーク-反クォークの S 波状態とし、 $a_1(1236)$ や $f_2(1270)$ などのスカラー、アクシャル・ベクター、テンサー状態を軌道角運動量の励起状態である P 波状態と理解する。従ってスカラー状態である σ 中間子はこの模型では $a_1(1236)$ や $f_2(1270)$ のようなアクシャル・ベクター、テンサー状態と同程度の質量を持つべきであり、1 GeV より軽い質量を持つスカラー中間子を説明することは困難となる。

しかしその一方、非相対論的なクォーク模型による解釈がどの程度正しいのかという疑問もある。クォーク模型とは異なる中間子のスペクトルを示唆する模型も存在する。例えば、中間子をクォークと反クォークがグルーオンの紐で結ばれていると考える模型 (Veneziano 模型) では ρ 中間子と同じ質量を持ったスカラー中間子が現れる。

このように、理論のみから σ 中間子の存在について議論するのは困難な状況にある一方で、実験的にもその存在を確立することは難しい。 σ 中間子が存在するとした場合、その存在は $\pi\pi$ 散乱の $I=J=0$ のチャネル (つまり σ 中間子と同じ量子数を持つチャネル) に大きな影響を及ぼすことが容易に想像できるが、このチャネルでの位相のずれの実験データを見る限り、950 MeV 以下のエネルギー領域に明確なレゾナンスを確認することはできない。

このような状況の下では、 σ 中間子の存在の有無についての議論するには、なんらかの方法で現象論的模型を構成し、それを実験データと比較していくことで進めていく必要がある。近年、そのようにしてさまざまな模型が提案され、研究がなされてきた。

Törnqvist と Roos はユニタリ化したクォーク模型をもちいて解析を行い、それを $\pi\pi$ 、 πK 、 $\pi\eta$ 散乱の S 波の実験データとフィットすることによって、860 MeV くらいの質量を持ち、非常に広い崩壊幅を持った $u\bar{u} + d\bar{d}$ 状態が存在することを見出した。そして彼らはこれが σ 中間子であると解釈した。しかし、Törnqvist と Roos がもちいた模型には交叉 (crossing) 対称性がまったく含まれていない。それに関連して、Isgur と Speth は、交叉対称性を含めることで $\pi\pi$ 散乱の S 波の位相のずれを説明することができるのではないか、という指摘をしている。

また、Ang らは、低エネルギーで有効な理論であるカイラル摂動理論を Padé 近似をもちいてユニタリ化した模型で $\pi\pi$ 散乱の S 波の位相のずれを調べている。この模型では σ 中間子を導入する必要なく、実験データを再現している。しかしこの模型ではユニタリ化した部分波散乱振幅にいくつかの非物理的な極が現れることがわかっている。つまりこれは、部分波散乱振幅の持つべき解析性が正しく含まれていないことを意味している。

このように、これまでの研究はいくつかの点で不十分に見える。まず、交叉対称性や解析性といった散乱振幅が持つべき一般的性質が、必ずしも尊重されているわけではないこと。また、模型による不定

性がどの程度あるのかが不透明であること、である。部分波散乱振幅が持つべき一般的性質である、低エネルギー定理、ユニタリ性、解析性、交叉対称性を第一に考え、これらをできる限り尊重するようなモデルを構成することが望ましい。そして、もしそのようなモデルを構成できたなら、そのモデルはモデルに依存しない一般的な性質を持っていることが期待できる。

そのような精神に基づいて構成されたモデルのひとつが Igi と Hikasa によって提案されている。彼らのモデルでは N/D 法という方法をもちいることによって、上記に挙げた部分波散乱振幅の基本的性質を取り込んでいる。また、 σ 中間子の存在の有無に焦点を絞り、1GeV 以下のエネルギー領域での $\pi\pi$ 散乱の位相のずれに着目して解析を行い、その結果 σ 中間子の存在を示唆する結果を得ている。

一方で、Igi と Hikasa のモデルにもいくつか不十分な点が残されている。ひとつめとして、彼らの論文ではカイラル極限(つまり π 中間子の質量がゼロの極限)でのみしか解析が行われていないことである。 π 中間子の質量を正しく入れることが結果にどのように影響を与えるかを評価する必要がある。ふたつめに、彼らの論文では、 σ 中間子の質量や π 中間子との結合定数といったパラメータは ρ 中間子と縮退している、という仮定の下に解析していることである。 σ 中間子と ρ 中間子の縮退はいくつかのモデルで提案されていることではあるが、 $\pi\pi$ 散乱の実験データからこれらのパラメータをフィットし、もっともらしい値を決定することが重要である。そうすることによって、 σ 中間子がどのような粒子なのかを探る手助けになるはずである。

本論文では、Igi と Hikasa の枠組みで、より現実的に物理的な π 中間子の質量である $M_\pi = 135 \text{ MeV}$ を含めて 1GeV 以下の $\pi\pi$ 散乱を解析した。 π 中間子の質量を含めることで $\pi\pi$ 散乱の位相のずれがどのように影響を受けるかを評価し、その効果が $\pi\pi$ 散乱のしきい値付近以外のエネルギー領域では比較的小さいことを見出した。 σ 中間子が存在しないと仮定した場合には、カイラル極限の場合同様、 $\pi\pi$ 散乱の位相のずれは実験データの半分ほどしか説明できず、 σ 中間子を含めると実験データを非常によく再現できる。これは σ 中間子の存在を示唆する結果である。

その結果を受け、 σ 中間子の質量と結合定数といったパラメータを実験データとフィットすることで、 $M_\sigma = 837 \text{ MeV}$ という値を得た。また、位相のずれの勾配から σ 中間子の幅を得、それが $\Gamma_\sigma = 913 \text{ MeV}$ と質量程度の非常に大きいものであることを確かめた。

このように幅が非常に大きい場合、位相のずれの勾配から得られる幅は現実の崩壊幅とは見なせない。そこで本論文では、部分散乱振幅が持つ極の位置を調べることで上記とは異なる定義の質量と崩壊幅についても調べた。

論文審査の結果の要旨

素粒子の強い相互作用の基礎理論が量子色力学であることが確立して久しい。高エネルギーの現象は摂動論を用いて非常によく記述することができる。しかし、低エネルギー領域ではゲージ結合が強くなるため、いまだに限られた理解しか得られていない。

強い相互作用をするボソンである中間子は、一般にはクォーク模型によってクォーク・反クォークの束縛状態として理解されている。質量の小さい中間子として、 π 中間子などの擬スカラー、 ρ 中間子などのベクトル粒子の存在がクォーク模型で説明できる。

一方、 ρ 中間子と同程度の質量のスカラー粒子（ σ 中間子と呼ばれる）は、クォーク模型には現れない状態であるが、これが存在するかどうかは長年の問題となっている。この粒子が存在すれば、低エネルギーの $\pi\pi$ 散乱において直接観測できると思われるが、実験データの解釈は難しく、さまざまな模型を用いた分析が行われており、明確な結論は出ていない。

赤間尚之はこの問題に対し、従来軽視されがちであった、散乱振幅のもつクロッシング対称性や解析性を最大限生かした N/D 法を用いて、新たな解析を行った。この方法は、以前でも π 中間子の質量を 0 とした近似では計算が行われていたが、赤間は π 中間子の質量を正しく含めた計算を遂行し、実験データとの比較を行った。

この結果、 σ 中間子が存在しないとすると実験を再現することは難しく、 σ が存在する場合にはかなりよく実験と一致することが見いだされた。また、データから σ の質量、崩壊幅の決定を行った。

これは赤間尚之が自立した研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を持つことを示している。よって赤間尚之提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。